

文章编号:1005-4642(2022)07-0018-04

基于 Tracker 的雪崩现象演示实验

迟逢逢¹, 张家晨¹, 李 斌¹, 韦先涛²

(1. 南京邮电大学 理学院, 江苏 南京 210023;

2. 中国科学技术大学 物理实验教学中心, 安徽 合肥 230026)

摘 要: 为了对雪崩现象进行实验演示, 利用示波器、信号放大器、扬声器和 Tracker 软件, 搭建了声波诱导崩塌的实验装置. 利用该装置测量并计算了在不同频率声波诱导下, 5 种石英砂堆的静止角、稳定角和崩塌角, 获得了其崩塌峰值频率与颗粒粒径的关系.

关键词: 雪崩现象; 堆积; 声波诱导; Tracker

中图分类号: O422.6; O415.3

文献标识码: A

DOI: 10.19655/j.cnki.1005-4642.2022.07.004

沙土、碎石和降雪的堆积是自然界中的常见现象, 自然界中广泛存在的堆积行为造就了很多奇观, 同时也威胁着人类的安全. 例如人们常被告诫禁止在雪山附近大声喧哗, 这是因为特定频率的声音会引起雪崩灾害. 离散颗粒的堆积与雪崩一直是离散力学研究的热点^[1-2]. 研究雪崩现象有利于做好灾害防控和指导堆积密集型产业安全堆积, 同时也有利于控制颗粒在传送带上高效流动. 大学物理中对多质点体系的应力、摩擦力和机械波的传播进行了详细论述^[3], 但在物理实验课程中却少有能同时结合这些力学和声学知识点的实验. 本文利用常用的器材搭建了声波诱导崩塌的实验装置, 演示了雪崩现象, 探究了石英砂颗粒对不同频率声波的响应结果, 并进行了分析讨论.

1 实验材料与仪器

1.1 石英砂颗粒

在实验室环境, 采用颗粒粒径为 0.125 ~ 8 mm 的石英砂演示声波诱导发生雪崩的现象较为明显. 粒径过大的颗粒难以在有限空间内达到所需要的数目, 粒径较小的颗粒容易产生扬尘, 从而污染实验操作环境. 此外, 粒径过小的石英砂

颗粒需要频率更高的声波进行诱导, 对实验环境要求更加苛刻, 实验所用扬声器不能满足细小颗粒的频率要求.

如图 1 所示, 按石英砂粒径的尺寸编号为 A ($4\text{ mm} < D \leq 8\text{ mm}$), B ($2\text{ mm} < D \leq 4\text{ mm}$), C ($0.5\text{ mm} < D \leq 1.0\text{ mm}$), D ($0.2\text{ mm} < D \leq 0.5\text{ mm}$), E ($0.125\text{ mm} < D \leq 0.2\text{ mm}$).

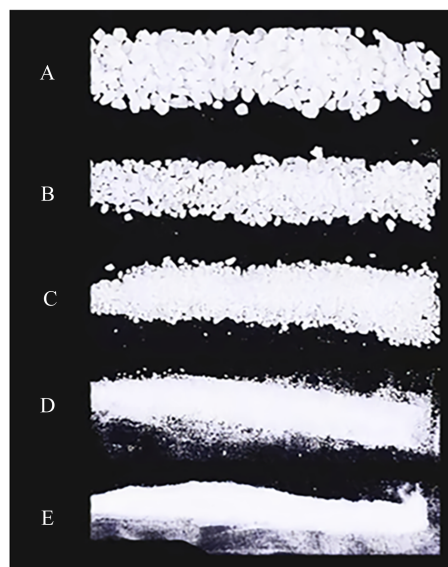


图 1 5 种不同粒径的石英砂

收稿日期: 2022-03-28; **修改日期:** 2022-04-28

基金项目: 江苏省高等教育学会专项课题 (No. 2020JDKT035)

作者简介: 迟逢逢 (1991—), 男, 安徽马鞍山人, 南京邮电大学理学院讲师, 博士, 从事物理实验教学工作. E-mail: ffchi@njupt.edu.cn

通讯作者: 韦先涛 (1982—), 男, 陕西镇巴人, 中国科学技术大学物理实验教学中心高级实验师, 博士, 从事物理实验教学工作. E-mail: wxt@ustc.edu.cn

1.2 声波诱导崩塌实验装置

声波诱导崩塌实验装置主要由信号发生器、放大器、高保真扬声器、铁架台和漏斗组成。信号发生器型号为 SIGLENT SDG 2042X, 频率精度为 1×10^{-6} Hz, 满足实验的精度要求。放大器型号为 HAOTIAN TECHNOLOGY AV-2200, 输出阻抗为 10Ω 。高保真扬声器的阻抗为 8Ω , 有效频率为 $20 \sim 1\,000$ Hz。扬声器的性能满足实验需求, 并且扬声器与放大器的阻抗匹配。

声波诱导崩塌实验装置的示意图如图 2 所示。将规格为 $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的木板放在扬声器之上, 中央与扬声器恰好接触。为了避免实验中木板产生过大位移, 需要在木板四周采取吸能措施, 实验中采用定制尺寸的吸音海绵。吸音海绵能在不破坏扬声器与木板恰好接触的条件下最大程度提高诱导平台的稳定性, 防止木板过度移位导致堆积体系发生非声波因素的崩塌。

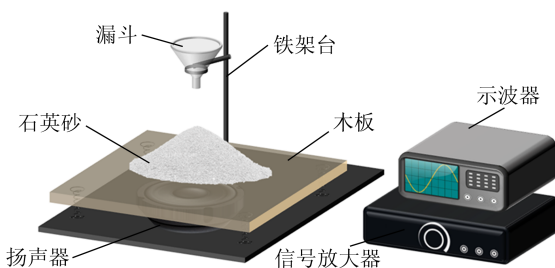


图 2 声波诱导崩塌实验装置示意图

声波诱导崩塌实验装置实物图如图 3 所示。图 3 中为了展示出实验所使用的扬声器, 将扬声器置于木板之上, 在实际操作时将扬声器置于木板对角线交点的正下方。

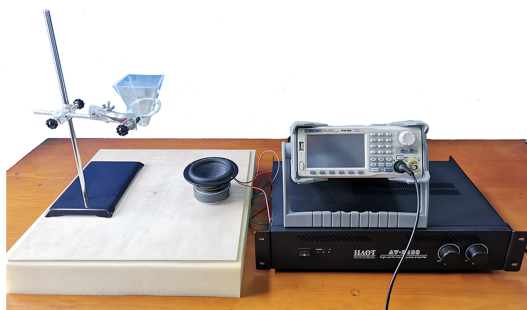


图 3 声波诱导崩塌实验装置的实物图

2 实验内容及分析

2.1 崩塌角的定义

在自然界中, 频率合适的声波可以诱导雪崩

的发生。经过探究发现, 在实验室环境下利用特定频率的声波可以有效地诱导石英砂的锥形堆发生坡面雪崩。自然堆积的石英砂的锥形堆发生雪崩的条件与石英砂的粒径和声波频率密切相关。利用声波诱导石英砂的锥形堆发生雪崩, 并不要求在锥形堆的底面提供较大的能流密度, 只要频率合适, 声波只需要提供极小的能量就能使锥形堆发生雪崩。

为了量化石英砂的锥形堆的崩塌程度, 定义崩塌角

$$\Delta\theta = \theta_0 - \theta_t, \quad (1)$$

其中, θ_0 为静止角, 表示颗粒在不受任何限制和外力作用时, 由一定高度自然下落到水平面上, 达到相当数量 and 高度之后, 自动形成的圆锥体的母线和底平面(即水平面)的夹角^[2]; θ_t 为稳定角, 表示在声波作用 2 s 后, 砂堆的母线与水平面所构成的夹角。在前期开展的实验中发现, 颗粒体系在声波作用的前 1 s 内发生剧烈崩塌, 而在 2 s 以后崩塌很微弱, 测得的角度基本不变。因此, 在本文中将 θ_t 定义为声波作用 2 s 后的稳定角。

2.2 石英砂堆的浇筑

首先检查实验器材各部分是否接通良好, 置于扬声器上的木板是否水平, 然后利用图 3 所示的漏斗向木板平面上浇筑石英砂。浇筑石英砂堆期间应保证漏斗下端持续流动, 以避免石英砂流冲击造成削峰现象, 同时要保证木板水平稳定, 防止外界扰动造成石英砂堆提前崩塌。

2.3 静止角的测量

浇筑砂堆后, 在正面和侧面摄像, 摄像时保证画面水平中轴线与木板齐平, 即正好看不见木板的上表面。将所得图像导入 Tracker 软件进行角度定标^[4-5], 每个图像均要取左右 2 个坡面角数据, 定标取角如图 4 所示, 最终获得 4 个有效角度 $\theta_1 \sim \theta_4$ 。计算静止角 θ_0 时取 4 个角度的平均值。计算得到静止角的不确定度结果见表 1。



图 4 静止角的测量

表 1 5 种颗粒的静止角的不确定度

编号	$U_A/(^\circ)$	$U_B/(^\circ)$	$U_{合成}/(^\circ)$	$\theta_0/(^\circ)$
A	1.0	0.1	1.1	41.3
B	0.80	0.1	0.90	39.6
C	0.32	0.1	0.34	37.3
D	0.35	0.1	0.37	36.5
E	0.39	0.1	0.41	35.8

可以看出 A 和 B 号颗粒的静止角测量结果误差较大,这可能是由于这 2 种颗粒的粒径和尺寸分布较大导致. 粒径小的颗粒间接触面小、接触点少、接触摩擦力小,而粒径大的颗粒则相反^[2]. 粒径尺寸的分布较大时,较小的颗粒会填充较大颗粒之间的堆积间隙,从而影响静止角的测量.

2.4 稳定角的测量

将扬声器的输出功率调整至合适范围内,保证当木板上只有少量颗粒时,颗粒不会被振离木板,实验中设置扬声器的输出功率为 18 W. 为了得到不同频率声波下的稳定角,从 20 Hz 开始,在声波作用 2 s 后,测量稳定角,方法与测量静止角相同. 每隔 20 Hz 测量 1 次数据,在极大值附近改为每隔 5 Hz 记录 1 次数据. 频率变化范围为 20~1 000 Hz. 测量完全部频率的稳定角后,将砂粒回收,更换成其他编号的砂粒,并重新浇筑锥形堆,固定扬声器的输出功率,重复前面的操作步骤,直至将 5 种颗粒的稳定角 θ_i 全部测量完毕. 在选择频率时可以有疏密,即在崩塌现象显著的频率附近密集取点,在崩塌现象不显著的频率区间取较疏的点.

2.5 崩塌角与诱导频率的关系

记录不同粒径的石英砂锥形堆的静止角 θ_0 和稳定角 θ_i ,利用式(1)计算不同诱导频率下砂堆的崩塌角 $\Delta\theta$,绘制崩塌角 $\Delta\theta$ 与诱导频率 f 的变化曲线,如图 5 所示. 用光滑的曲线对图 5 中的数据点进行拟合,从拟合曲线中可以得到 5 种颗粒最敏感的声波频率,即峰值频率,结果见表 2. 其中低频崩塌峰值频率指石英砂堆在低频声波诱导下 $\Delta\theta$ 极大值对应的频率,高频崩塌峰值频率则是在高频声波诱导下 $\Delta\theta$ 极大值对应的频率. 由于实验室扬声器频率的限制(20~1 000 Hz),实验中没有获得 A、B 和 C 号颗粒的低频崩塌峰值频率.

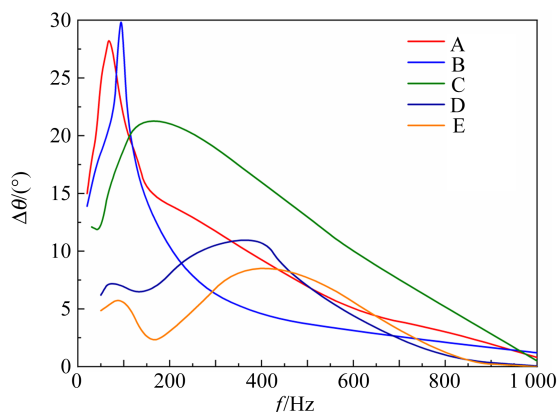


图 5 5 种颗粒的崩塌角度与诱导频率的关系

表 2 石英砂颗粒的崩塌峰值频率

编号	f/Hz	
	低频	高频
A	—	69.2
B	—	104.3
C	—	183.5
D	73.0	307.6
E	85.9	397.4

2.6 高频崩塌峰值频率与颗粒粒径的关系

砂堆对声音的敏感程度不取决于砂堆的大小或形状,只取决于颗粒的粒径^[6]. 进一步探究粒径与崩塌峰值频率的关系,有利于预测不同堆积体系的敏感声波频率.

文献[7]通过理论推导得出了砂堆雪崩时发出的声音频率 f 与粒径 D 满足:

$$f = \sqrt{\frac{g\lambda}{8D}}, \quad (2)$$

其中, λ 为与砂堆颗粒种类相关的系数, g 为重力加速度, D 为砂粒的粒径, f 为声波频率. 文献[7]认为砂堆雪崩时发出声音现象的本质是特殊的共振模型并且可以由外界提供砂堆的发声频率 f 来促使沙堆发生雪崩.

取本文所用 5 种石英砂颗粒粒径区间的中间值作为粒径 D ,以高频崩塌峰值频率作为频率 f ,绘制 f 和 D 之间的关系图. 采用与式(2)同一类型的函数

$$f = \frac{a}{\sqrt{D}} \quad (3)$$

对实验数据进行拟合. 式(3)中的 a 为常量,可以通过拟合得到,拟合结果如图 6 所示. 砂粒粒径

越大,高频崩塌峰值频率越小,实验结果与理论基本相吻合.因此,通过图6可以获得不同粒径的砂粒堆体系的高频崩塌峰值频率,同时也能解释在山谷中尖叫会有一定概率触发雪崩的现象.

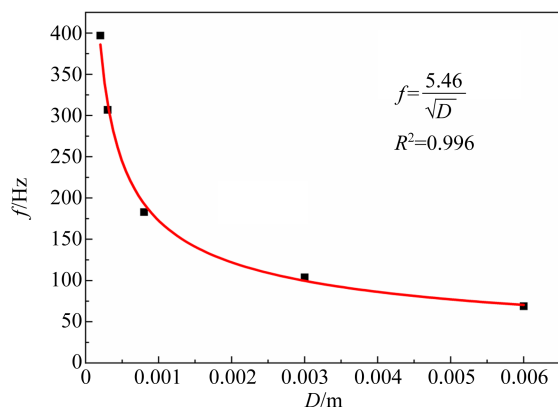


图6 高频崩塌峰值频率与砂粒粒径的关系

3 结束语

雪崩现象在自然界中广泛存在,研究雪崩行为对人类安全 and 生产生活具有较大意义.本文利用物理实验课程常用的信号发生器、放大器、高保真扬声器、铁架台和漏斗搭建了声波诱导崩塌的实验装置.实验装置简单、成本低、测量结果稳定.利用该装置测量并计算了不同频率声波诱导

下,5种石英砂堆的静止角、崩塌角和稳定角,获得了高频崩塌峰值频率与砂粒粒径之间的变化关系,实验结果与理论公式相符合.本实验可以为大学物理实验中声学实验的教学提供参考,培养学生的探索能力和团队合作能力,激发学生对物理实验的学习兴趣.

参考文献:

- [1] 孙其诚,王光谦.静态堆积颗粒中的力链分布[J].物理学报,2008,57(8):4667-4674.
- [2] 周向玲,麦麦提吐逊·阿布都热依木,俞胜清,等.自然沙堆积的静止角研究[J].山东大学学报(理学版),2015,50(7):56-59.
- [3] 漆安慎,杜婵英.普通物理学教程·力学[M].北京:高等教育出版社,2012.
- [4] 贾昱,程敏熙,安盟,等.基于视频分析软件 Tracker 测量刚体转动惯量[J].物理实验,2014,34(5):33-35.
- [5] 曾蓓,程敏熙.视频分析软件 Tracker 在复摆实验中的应用[J].物理实验,2018,38(6):29-31.
- [6] Simon D, Sandrine N, Sylvain C P, et al. Laboratory singing sand avalanches [J]. Ultrasonics, 2010,50(2):127-132.
- [7] Sholtz P, Bretz M, Nori F. Sound-producing sand avalanches [J]. Contemporary Physics, 1997, 38(5):329-34.

Demonstration experiment of avalanche phenomenon based on Tracker

CHI Feng-feng¹, ZHANG Jia-chen¹, LI Bin¹, WEI Xian-tao²

(1. School of Science, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China;

2. Physical Experiments Teaching Centre, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: An experimental device for acoustic-induced avalanche was constructed by using an oscilloscope, a signal amplifier, a loudspeaker and Tracker software. The device was used to measure and calculate the repose angle, collapse angle and stability angle of five kinds of quartz sand piles induced by different frequencies of acoustic waves, as well the relationship between the collapse peak frequency and particle size was obtained.

Key words: avalanche phenomenon; heap; acoustic waves induction; Tracker

[责任编辑:任德香]